第 37 卷第 2 期 2017 年 1 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.2 Jan.,2017

DOI: 10.5846/stxb201507091458
刘乐乐,赵小锋,赵颜创,邓君俊.基于城市环境气候图的宁波大气环境分析与调控对策.生态学报,2017,37(2):606-618.
Liu L L,Zhao X F,Zhao Y C,Deng J J.Ningbo atmospheric environment analysis and regulating countermeasure based on Urban Climatic Map.Acta Ecologica Sinica,2017,37(2):606-618.

基于城市环境气候图的宁波大气环境分析与调控对策

刘乐乐[1,2,3],赵小锋[1,2,*],赵颜创[1,2],邓君俊[1,2]
1 中国科学院城市环境研究所,城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021
2 中国科学院宁波城市环境观测研究站, 宁波 315800
3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:城市化的蓬勃发展改变了城市气候和环境,产生了诸多气候环境问题,需要有效的城市气候环境信息与调控对策来应对和缓解,城市环境气候图在城市气候环境的规划与调控方面提供了重要指导。在传统城市气候图的基础上,提出了多季节、多环境要素相结合的城市环境气候图构建方法。在此基础上,以具有复杂下垫面和明显季节性气候特征的宁波市区为案例,综合运用遥感反演、GIS 空间分析、中尺度数值模拟等技术手段,对城市热负荷、大气污染、通风潜力和风场及整体的城市气候环境进行多季节分析与评估。结果表明:在形成城市气候环境的主要要素方面,城市热负荷、大气污染物分布都具有显著的季节性和空间性差异,宁波市春、夏季同时受热负荷和大气污染影响,冬季仅受大气污染影响,秋季受二者影响均较小;通风潜力的空间格局各季节之间具有高度的相似性;风环境复杂多变,呈现出显著的季节性和空间性差异。对城市气候环境的整体分析发现,城市气候环境高价值区和中价值区主要分布于山林、农田和水体,高风险区位于北仑、镇海和杭州湾南岸的沿海重化工业带,中风险区分布于江北区东部、鄞州城区东西两翼、慈溪城区和奉化城区东北部等工厂厂房密集的区域。进一步在前述分析的基础上,提出了城市风道规划方案和气候环境调控对策,包括 2 条一级风道、5 条二级风道、3 条受海陆风影响的三级双向风道、12 条受海陆风影响的三级单向风道、13 条受山谷风影响的三级单向风道和七类城市气候环境调控对策。提出的多季节、多环境要素相结合的城市环境气候图构建方法适用于季风气候地区复杂气候环境的分析与评估研究,能够提高城市气候环境分析的综合性和准确性,并能够通过风道规划及相关调控对策的制定和实施改善城市热负荷和大气环境质量,缓解各季节的城市气候环境问题,为城市环保、气象、规划等部门提供重要的决策支持,从而促进城市可持续发展和生态城市建设。
关键词:城市气候;热负荷;风环境;城市规划;风道;调控对策;宁波市

Ningbo atmospheric environment analysis and regulating countermeasure based on Urban Climatic Map

LIU Lele[1,2,3],ZHAO Xiaofeng[1,2,*],ZHAO Yanchuang[1,2],DENG Junjun[1,2]
1 *Key Laboratory of Urban Environment and Health*, *Institute of Urban Environment*, *Chinese Academy of Sciences*, *Xiamen* 361021, *China*
2 *Ningbo Urban Environment Observation and Research Station*, *Chinese Academy of Sciences*, *Ningbo* 315800, *China*
3 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing*100049, *China*

Abstract: Rapid urbanization has changed the urban climate and environment. As a result, many climatic and environmental problems have emerged. Valid urban climatic environment analysis and regulating countermeasures are required in order to cope with and mitigate these issues. An urban climatic map provides important guidance for the planning and regulation of the urban climatic environment. Based on a traditional urban climatic map, this research proposes a new method of building an urban climatic map that considers all seasons and multiple environmental elements. The urban area in

基金项目:宁波市自然科学基金资助项目(201301A6107021);中国科学院重点布署资助项目(KJZD-EW-TZ-G06-02);高分辨率对地观测系统重大专项资助项目(30-Y30B13-9003-14/16)
收稿日期:2015-07-09; **网络出版日期**:2016-06-13
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xfzhao@ iue.ac.cn

Ningbo City, with its complicated underlying surfaces and obvious seasonal climate characteristics, was used as a case study. The technical means, including remote-sensing inversion, spatial analysis of geographical information system (GIS), and mesoscale numerical model simulation, were comprehensively applied to conduct a multi-season analysis and evaluation of the urban thermal load, air pollution, ventilation potential, wind field, and overall urban climatic environment. The results indicate that the spatial distribution of the urban thermal load and air pollutants is characterized by significant seasonal and spatial differences in the principal elements of the formation of an urban climatic environment. Ningbo City is affected by both thermal load and air pollution in spring and summer, affected only by air pollution in the winter, and only slightly affected by both thermal load and air pollution in the autumn. The spatial patterns of ventilation potential are similar in all seasons. Remarkable seasonal and spatial differences are presented, as the wind environment is complex and subject to change. By conducting an overall analysis on urban climatic environments, we found that areas with high and middle values of urban climatic environment are mainly distributed in forests, croplands, and water bodies. Areas with a high risk of urban climatic environment are located in the heavy chemical industrial zones along the coast of Beilun District, Zhenhai District, as well as the southern part of Hangzhou Bay. Areas with an intermediate risk of urban climatic environments are found in the regions where large amounts of industrial factories are clustered, such as the eastern Jiangbei District, eastern and western sides of Yinzhou District, Cixi urban area, and northeast part of the Fenghua urban area. Based on the above analysis, the planning schemes of urban ventilation channels and the regulating countermeasures of climatic environments are further proposed. These include two first-class ventilation channels, five second-class ventilation channels, three third-class bidirectional ventilation channels which are impacted by land-sea breezes, twelve third-class unidirectional ventilation channels which are impacted by land-sea breezes, thirteen third-class unidirectional ventilation channels which are impacted by mountain-valley breezes, and seven types of countermeasures for urban climatic environment regulation. The method of building an urban climatic map considering all seasons and multiple environmental factors raised by this research is applicable to the analysis and evaluation research of the monsoon climate zones with complicated climatic environments. It may also improve urban thermal load and atmospheric environmental quality and ease the problems of urban climatic environments in all seasons. It may do so through ventilation channel planning and formulating and implementing relevant regulatory countermeasures so as to provide support for urban environmental protection, meteorological and planning departments, and promote sustainable urban development and the construction of an ecological city.

Key Words: urban climate; thermal load; wind environment; urban planning; ventilation channel; regulation countermeasure; Ningbo City

近 30 多年来我国城市化发展迅猛,伴随着高速的工业化和城镇化进程,城市环境问题日趋严重,尤其是城市热岛[1-2]和灰霾[3-4],引起了各大城市的广泛重视。2013 中国环境状况公报显示,全国平均雾霾日数达 35.9d,平均雾霾天数达 52 年以来之最[5]。由于污染物减排不可能无限制进行,如何通过一定的城市规划和管理策略,改善污染物扩散条件,从而提高大气环境质量,已经成为大气环境污染调控领域的一个热点问题。城市环境气候图(Urban Climatic Map, UCMap)是近年来兴起的一种融合了城市气候环境和规划建设相关因素的信息评估工具,利用两维空间展现城市气候环境现象和现存问题,并结合城市土地利用现状等信息做出科学评估最终指导城市建设与规划实践[6]。德国 Knoch 教授于 20 世纪 50 年代首次建议绘制一系列不同尺度且适合当地规划系统的城市环境气候图[7]。20 世纪 70 年代,斯图加特市气候学家为减低弱风环境下的气候污染问题,首次开展城市环境气候图研究[8]。此后,德国其他城市和瑞士、奥地利、日本等 20 多个国家及我国的香港、北京、高雄、武汉等城市陆续开展城市环境气候图的研究,以指导改善城市气候环境,营造健康舒适的人居环境[9-13]。其中,日本结合德国的成功经验,通过分析城市的热环境,利用海风等"风之道"来缓和城市热岛效应,形成了自己的研究体系[10-11]。中国香港基于德国和日本等研究经验,利用地理信息数据、实地测

量、风洞模拟等手段提高研究结果的准确性[14]。

以往的城市环境气候图研究,在评估环境要素方面,多数主要考虑了城市热岛问题,即便考虑大气污染也很少考虑灰霾等近几年才在国内得到广泛重视的环境问题,例如日本 Tokyo 和 Sakai 等多个城市先后开展的城市环境气候图研究[10-11]、贺晓冬等对北京市的研究[12]和林姚宇等对深圳市的研究[13]都仅从热负荷问题进行分析与评估。在热负荷和大气环境信息获取方面,多采用地面台站监测数据,而缺乏多源遥感反演信息的综合应用,例如吴恩融团队对香港和高雄市的气候环境研究等[14-15]。在评估季节选取方面,既有研究多数仅考虑夏季或冬夏两季,缺乏对四季城市气候环境的全面综合分析,例如吴恩融等对香港气候环境研究[15]、张伟等对北京夏季的城市气候环境分析与评估工作[16]。在季风气候区由于复杂的自然环境和快速发展的城市化形成了具有明显季节性的城市气候环境特征,仅分析评价单一季节或单一环境问题的城市气候环境研究已不能满足当今城市规划和发展的需要。本研究针对既有研究中存在的问题,以宁波市区为研究区,使用多源遥感反演信息和时空数据,提出多季节、多环境要素相结合的城市环境气候图构建方法,以适用于季风气候地区复杂气候环境的分析与评估研究。

1 研究区概况

宁波市位于中国海岸线中段,地理位置为 120°55′E—122°16′ E、28°51′N—30°33′N,属于亚热带季风气候,四季分明,季风交替明显,多年平均气温为 16.4℃,最热和最冷月份分别为 7 月和 1 月,月均温度分别为 28.0℃、4.7 ℃。地势西南高,东北低。综合考虑周围环境对宁波市区的影响,将研究范围定为宁波市区及周围的慈溪市、余姚市、奉化市(图 1)。

近 30 年来,宁波城市化的快速发展、人口的膨胀、建筑密度和高度的增加、自然地貌的改变,使城市下垫面更为粗糙,城市内部风速减小,引起高温天气、雾霾等极端天气频发[17-18]。宁波市区年平均气温走势总体呈现波动上升趋势,年平均风速走势总体呈现波动下降趋势[19]。一年四季都出现了城市热岛效应,热岛强度夏季明显强于冬季,并且呈增强趋势,热岛面积和热岛数量随城市化进程显著增加[18]。另一方面,雾霾的出现导致全市大气质量迅速下降,2013 年多次出现持续污染。如 12 月有 27d 污染,重度污染达 8d,AQI(Air Quality Index)指数达 448,创历史最高[20]。大气污染主要集中在春、冬两季,呈明显的季节性变化(图 2),市区污染程度明显高于郊区。

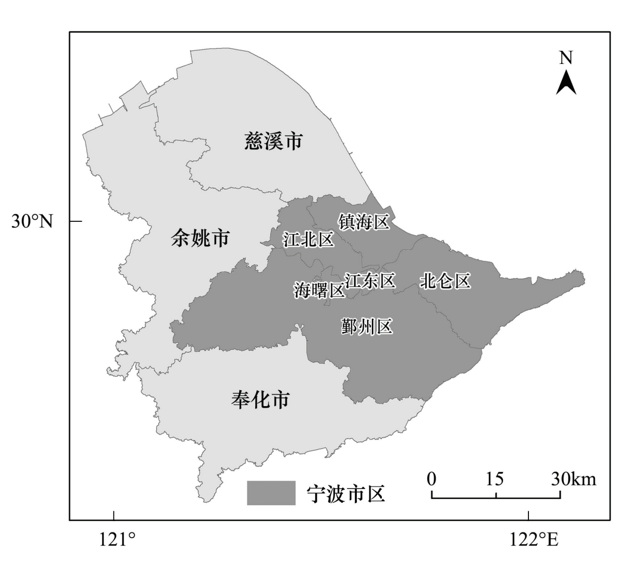


图 1 研究区示意图

Fig.1 Location of the study area

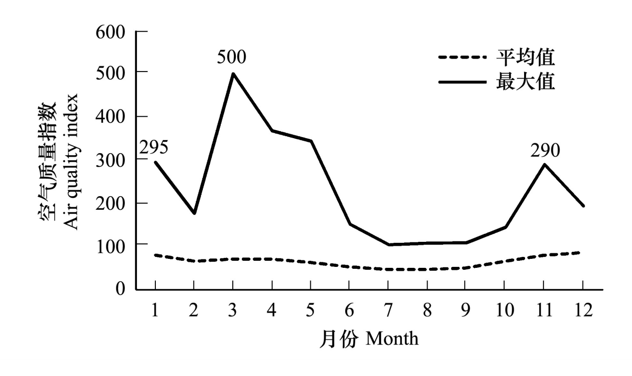


图 2 2000—2013 年 AQI 月度统计

Fig.2 Monthly AQI of the years 2000—2013

2 研究方法

宁波城市气候环境分析方法在传统城市气候图基础上,针对宁波城市气候环境问题,选取 4 月、7 月、10 月、翌年 1 月作为春季、夏季、秋季、冬季四季的代表月份,获取多个季节、多种环境问题的宁波市数据,并进行预处理。对各代表月份的城市热负荷、大气污染、通风潜力、风环境等城市气候环境进行分析,进而评估宁波气候环境,提出调控对策。宁波城市环境气候图的构建

流程如图 3。

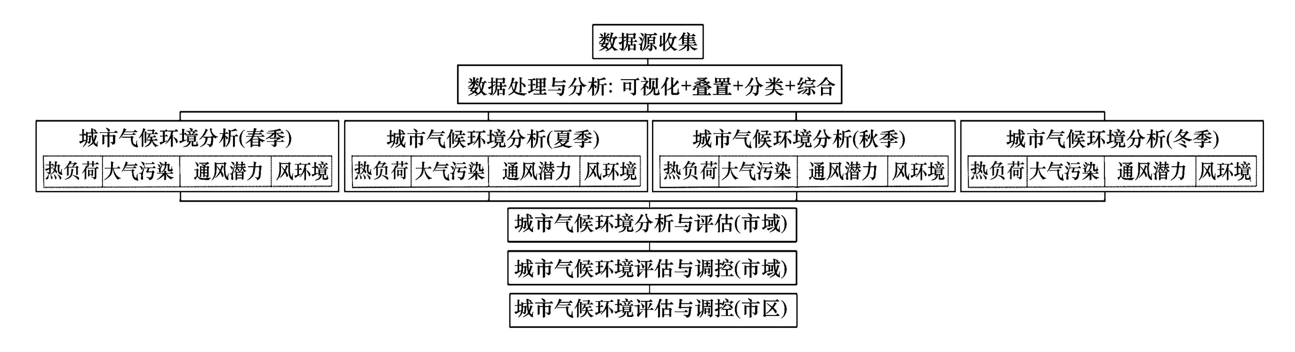


图 3　宁波城市气候环境评估与调控构建流程

Fig.3　The flowchart of assessment and regulation on climatic environment of Ningbo City

2.1　数据收集

根据研究目的和影像质量,在 2013—2014 年间选取各代表月份的 1 景 Landsat-8 影像数据,轨道号为 118/39。根据 2013—2014 年间大气质量监测统计数据 AQI 指数,选取各季节大气污染浓度较高时段的 MODIS 影像数据,轨道号为 H28V06。其它数据包括 30m×30m 分辨率的数字高程数据、人口统计数据(2010 年第六次人口普查的乡镇街常住人口统计数据)、气象数据等。所有影像均采用 GCS_WGS_1984 地理坐标系,UTM 投影坐标系(51N 带),30m×30m 分辨率。本研究所用影像、气象数据具体见表 1,采用的软件包括 ArcGIS 10.1、ENVI 5.0、WRF 2.2。

表 1　本研究所用影像、气象数据

Table 1　Remote sensing images and meteorological data used in this study

数据 Data	时间 Time	备注 Remarks
Landsat-8 OLI 、TIRS	2014-04-10	30m×30m 分辨率;轨道号 118/39
	2013-08-29	
	2013-11-17	
	2013-12-03	
MODIS	2014-03-10	1km×1km 分辨率;轨道号 H28V06
	2013-07-02	
	2013-10-28	
	2013-12-06	
气象数据 Meteorological data	2014-04-01—2014-04-30	8 个气象站点[a]的风速、风向观测数据;
	2013-07-01—2013-07-31	NECP 每 6h 更新 1 次的 1°×1°的再分析资料[b]
	2013-10-01—2013-10-31	
	2014-01-01—2014-01-31	

a: 8 个气象站点为北仑、慈溪、奉化、鄞州、余姚、镇海、宁海、象山;b:再分析资料包括以下 7 个基本要素:气温、位势高度、相对湿度、垂直速度、纬向风、经向风

2.2　数据预处理

2.2.1　土地覆被信息提取

使用 Landsat-8 OLI 影像提取植被数据、森林数据、水体数据和建设用地数据。首先对 OLI 影像 1—9 波段做重采样和波段合成,运用非监督分类法划分为 6 类土地覆被类型:森林、农田、建设用地、水体、其它。然后根据归一化植被指数 NDVI 值进行阈值分割,划分出 NDVI<0 为水体、0≤NDVI≤0.65 为裸土混合类型、NDVI>0.65 为植被,并对非监督分类结果进行修正。

2.2.2　地表温度反演

用 Landsat-8 热红外波段 TIRS 数据反演地表温度[21]。针对 Landsat-8 的波段特性,选取的热红外波段是

10 波段(10.6—11.19μm)。首先将像元灰度值转化为云顶辐射亮度,再对影像进行大气校正和发射率纠正,将云顶辐射亮度转换为地表辐射亮度,然后将地表辐射亮度转化为地表温度。其中,大气上行辐射亮度、大气下行辐射亮度、大气透射率来自于 NASA 网站的大气参数数值查询[22],基于土地覆盖分类结果,根据查找表对发射率进行赋值。

2.2.3 气溶胶光学厚度反演

气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth,AOD)反演采用暗像元算法。首先根据 6S 辐射传输模型计算不同观测状况下,气溶胶光学厚度与大气参数之间的对应关系,建立气溶胶光学厚度查找表。然后选取宁波地区 4 景 MODIS 影像数据,经预处理之后,利用 MODIS 2.1μm 波段提取暗像元,根据暗像元可见光波段与该波段的线性关系,计算红波段地表反射率,将其从红波段的表观反射率中去除,获取大气参数。最后读取影像数据中的太阳和传感器的天顶角与方位角,在建立的查找表中进行线性插值,得到气溶胶光学厚度[23]。

2.2.4 中尺度数值预报模式

本研究方案采用中尺度数值预报模式 WRF(Weather Research and Forecast Model)对宁波 2014 年 1 月、2013 年 4 月、2013 年 7 月和 2014 年 10 月的平均风速、平均风向进行模拟。模式采用四重嵌套方式,第四层(最内)网格模拟区域包括 120.55—122.64°E、28.98—30.49°N,66×54 格点数,3 km 水平格距,每 1h 输出 1 次结果,粗细网格选用 Ferrier 方案,长波辐射选用 RRTM 方案,短波辐射选用 Dudhia 方案,近地面层选用 Monin-Obukhov 方案,陆面参数选用 Noah 方案,并耦合城市冠层模型,积云参数化方案粗网格选用 Betts-Miller-Janjic 方案,细网格不采用积云参数化方案,边界层选用 MRF 方案[24-25]。将 WRF 模拟结果与实际观测数据进行对比,结果表明模拟出的风向、风速空间分布与观测数据具有较高的一致性,模拟的风速值与观测值之间的相关系数均在 0.82 以上。

2.2.5 山林提取

山地地区由于地形热力作用形成山谷风,促进当地大气流通。有植被的山地即山林地区是城区新鲜大气的重要发源地之一,对改善城区大气和风环境有重要影响[12]。采用 ArcGIS 10.1 空间分析工具的阈值分割操作对 DEM 数据进行坡度值划分:坡度 Slope≥40%和 Slope<40%,并使用 Buffer 工具对 Slope≥40%区域做 100m 缓冲区。然后与土地覆被分类结果叠加,提取 Slope≥40%的 100m 缓冲区范围内同时为植被覆盖的区域。

2.2.6 人口密度可视化

人口密度不仅对热负荷产生负面影响,而且在一定程度上反映了城市建筑物高度和密集,及其对通风潜力起负面影响。这里使用乡镇街名称作为关键字,将分乡镇街道的第六次人口普查常住人口统计数据与乡镇街道行政区划矢量数据进行关联,以实现人口统计数据的空间可视化,并计算各乡镇街的人口密度。

2.3 城市气候环境分析

2.3.1 城市热负荷分析

城市热负荷是城市内部温度升高的主要原因,为体现热负荷的空间差异,根据公式(2)使用地表温度数据计算获得热贡献指数 H:

$$H = \frac{T_i - \bar{T}}{\bar{T}} \times 100\% \tag{2}$$

式中,$\bar{T}$ 为区域平均温度,T_i 为第 i 个像元空间位置上对应的温度值[26]。为了更好的表征研究区内热负荷的空间分布特征,根据热贡献指数的直方图分布,对热贡献指数进行阈值分割,得到热负荷分析结果,其中所使用的阈值见表 2。

2.3.2 城市大气污染分析

气溶胶光学厚度是一个表征大气浑浊度的重要物理量,在一定程度上可以反映大气污染程度[23]。气溶胶光学厚度值的大小表征大气污染浓度的强弱,对 MODIS 气溶胶光学厚度进行阈值分割,共划分为 4 个等

级,所使用的阈值见表 3。

表 2　热负荷分析中使用的阈值

Table 2　Thresholds used in the segmentation of thermal load levels

热负荷水平 Thermal load levels	阈值 Threshold values	分类值 Classification values
高度冷负荷 High cooling load	≤-0.25	-3
中度冷负荷 Moderate cooling load	-0.25—-0.15	-2
低度冷负荷 Low cooling load	-0.15—-0.05	-1
过渡带 Neutral	-0.05—0.05	0
低度热负荷 Low thermal load	0.05—0.15	1
中度热负荷 Moderate thermal load	0.15—0.25	2
高度热负荷 High thermal load	≥0.25	3

表 3　大气污染分析中使用的阈值

Table 3　Thresholds used in the segmentation of air pollution levels

大气污染水平 Air pollution levels	阈值 Threshold values	分类值 Classification values
轻微 Slight air pollution	0—0.5	0
轻度 Mild air pollution	0.5—0.75	1
中度 Moderate air pollution	0.75—1	2
重度 Severe air pollution	≥1	3

2.3.3　城市通风潜力分析

自然地表的大气动力学特征表明,地表粗糙度较低的地表类型,具有较高的通风潜力,例如农田、水体等自然景观。森林、建设用地等地表粗糙度较高,通风潜力相对较弱。因此,对森林、山林、建设用地、水体进行分类赋值,所使用的阈值见表 4,并对构成要素进行叠加,得到 5 类通风潜力分析结果。

表 4　通风潜力分析中使用的阈值

Table 4　Thresholds used in the segmentation of ventilation potential levels

构成要素 Components	分类规则 Classification rules	分类值 Classification values
森林分布 Forest distribution	无森林覆盖区	0
	森林覆盖区	1
山林分布 Mountain forest distribution	有植被覆盖且坡度≥40%,以及 100m 缓冲区内	-1
	-1 分类值以外区域	0
建设用地分布 Construction land distribution	非建设用地、人口密度<500 人/km^{2}的建设用地	0
	500 人/ km^2≤人口密度≤2000 人/ km^{2}的建设用地	1
	人口密度>2000 人/ km^{2}的建设用地	2
水体分布 Water distribution	距海岸线≤1.5km、内陆水体及距水体边界≤30m	-2
	1.5km<距海岸线≤3km、30m<距内陆水体边界≤60m	-1
	距海岸线>3km、距内陆水体边界>60m	0

2.3.4　城市风环境分析

城市风环境是一个复杂的系统。为了更全面的分析高空风场和城市冠层风场的风环境变化特征,使用 ArcGIS 10.1 地理配准等操作把 WRF 模拟出的各代表月份平均风向、风速等风环境数据进行校正、输出和叠加分析,得到本研究的城市风环境分析结果。

2.3.5　城市气候环境分析与规划建议

城市气候环境分析是基于输入的各代表月份气候数据和土地覆被信息,分析评估城市气候环境状况[6]。

使用 ArcGIS 10.1 空间分析工具将筛选的各代表月份的热负荷、大气污染、通风潜力分析结果分别进行叠加计算和重分类,并叠加各代表月份的风环境分析结果,得到宁波市各代表月份的城市气候环境分析结果,并建立全年的城市气候环境分析。根据气候环境区的分布特征、各自的气候价值和规划应用目标对气候环境分析结果进行归类与评估,划定出城市气候环境高价值区、城市气候环境中价值区、城市气候环境低价值区、城市气候环境过渡区、城市气候环境低风险区、城市气候环境中风险区和城市气候环境高风险区。

城市气候环境规划建议是以城市气候环境分析结果为基础,在城市和区域尺度上,提出风道规划策略、绿化建议等改善城市气候环境的城市规划指导策略,以减缓气候环境问题,保护现存良好的气候环境区域[26]。其中,风道规划是以水体、山林等气候环境较好的城市气候环境中、高价值区作为上游,城镇、工业区等气候环境较差的城市气候环境中、高风险区作为下游,沿河流、街谷等可供冷空气通过的线状地物来规划风的流通路径,从而达到改善城市气候环境的目的。

3 结果与分析

3.1 各代表月份城市气候环境分析与评估

宁波城市热负荷在春、夏、秋、冬四季的分布和变化情况如图 4 所示,热负荷分布存在明显的季节性和空间性差异。建成区热负荷效应明显高于周边的农业用地、森林和水体,春、夏两季热负荷效应明显高于秋、冬两季,春、夏两季热负荷空间分布上较广,冬季热负荷集中分布于沿海工业区。全年热负荷主要分布于城镇中心区及其外围郊区,特别是北仑-镇海、慈溪-余姚等沿海工业带。对热负荷具有缓减缓作用的冷负荷主要分布于海拔较高的山区、植被茂盛的坡地和水域等。

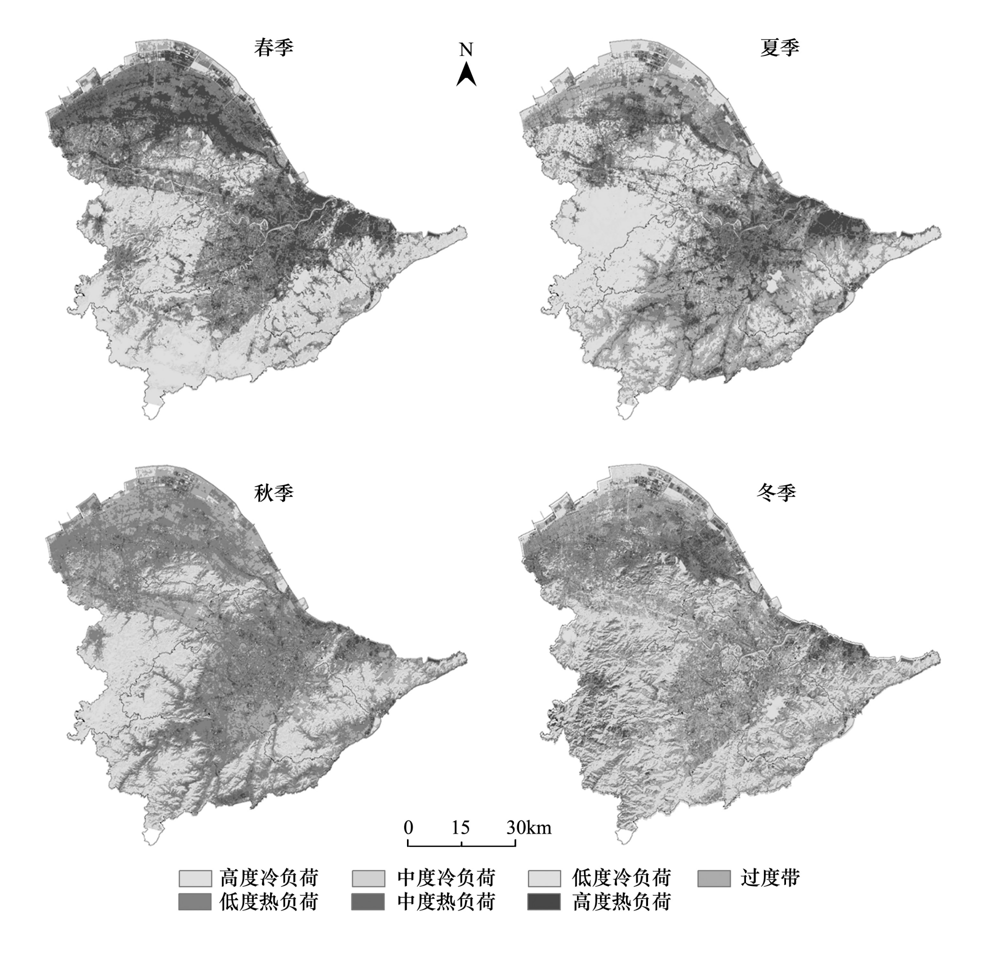


图 4 宁波市四季热负荷分析与评估

Fig.4 Analysis and evaluation on thermal load in four seasons of Ningbo City

四季的气溶胶光学厚度分布具有显著的季节性和空间性差异(图 5),春、夏、冬三季气溶胶光学厚度达到重度大气污染等级的区域分别是 706、684、500 km^2,春、冬两季气溶胶光学厚度分布面积最为广泛,分别占到研究区面积的 70%和 91%。宁波大气污染总体分布呈聚集化,重度大区污染区主要分布于沿海工业带和中心城区,中度大气污染区分布于城镇及其周边,轻度大气污染区多分布于中度大气污染和重度大气污染的周边地区,轻微大气污染的区域主要分布于海拔较高的山区。

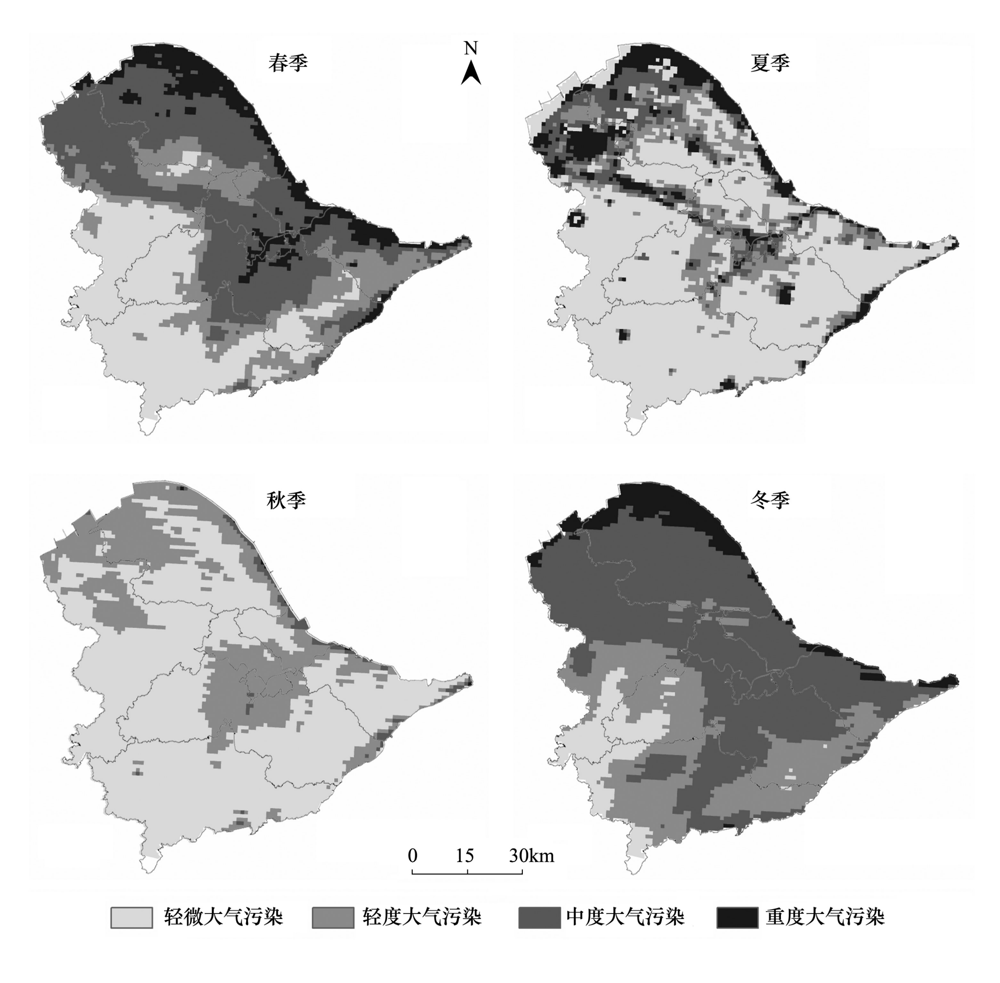


图 5　宁波市四季大气污染分析与评估

Fig.5　Analysis and evaluation on air pollution in four seasons of Ningbo City

宁波通风潜力分布和变化情况如图 6 所示,可以发现通风潜力分布具有显著的空间差异性,其空间格局在季节上则具有高度的相似性。各类型通风潜力斑块呈聚集分布,高度通风潜力分布于湖泊、河流和沿海地区,较高通风潜力多分布于农田,中度通风潜力分布于山林地区。较低通风潜力分布于城镇周边地区,低度通风潜力主要聚集于建筑、人口密度较高的三江口主城区、慈溪中心城区、北仑沿海工业地带等。低度通风潜力形成的主要原因是由于人口和建筑密度较高、建筑布局不合理等,尤其是老城区内部的建筑普遍低矮且高度均一,建筑排列紧密导致风的渗透性较差。

图 7 给出了宁波城市风环境分布情况。从图上可以看出,宁波整体城市风环境复杂多变,具有显著的季节性和空间性差异。春季以东风和东南风为主导风向,建成区平均风速约 5 m/s;夏季以东北风为主导风向,建成区整体通风不良,平均风速小于 0.5 m/s,山谷风作用显著;秋、冬两季以北风、西北风为主导风向,沿海地区风速高于建成区,建成区平均风速分别约为 4 m/s 和 1.5 m/s。从有利于污染物扩散的角度出发,一般水平风速低于 0.5 m/s 时易造成通风不良、污染物扩散能力减弱[13],因此对于建成区而言,需要合理利用风环境信息,合理布局建筑物密度和排列方式,营造开阔宽敞的风道。

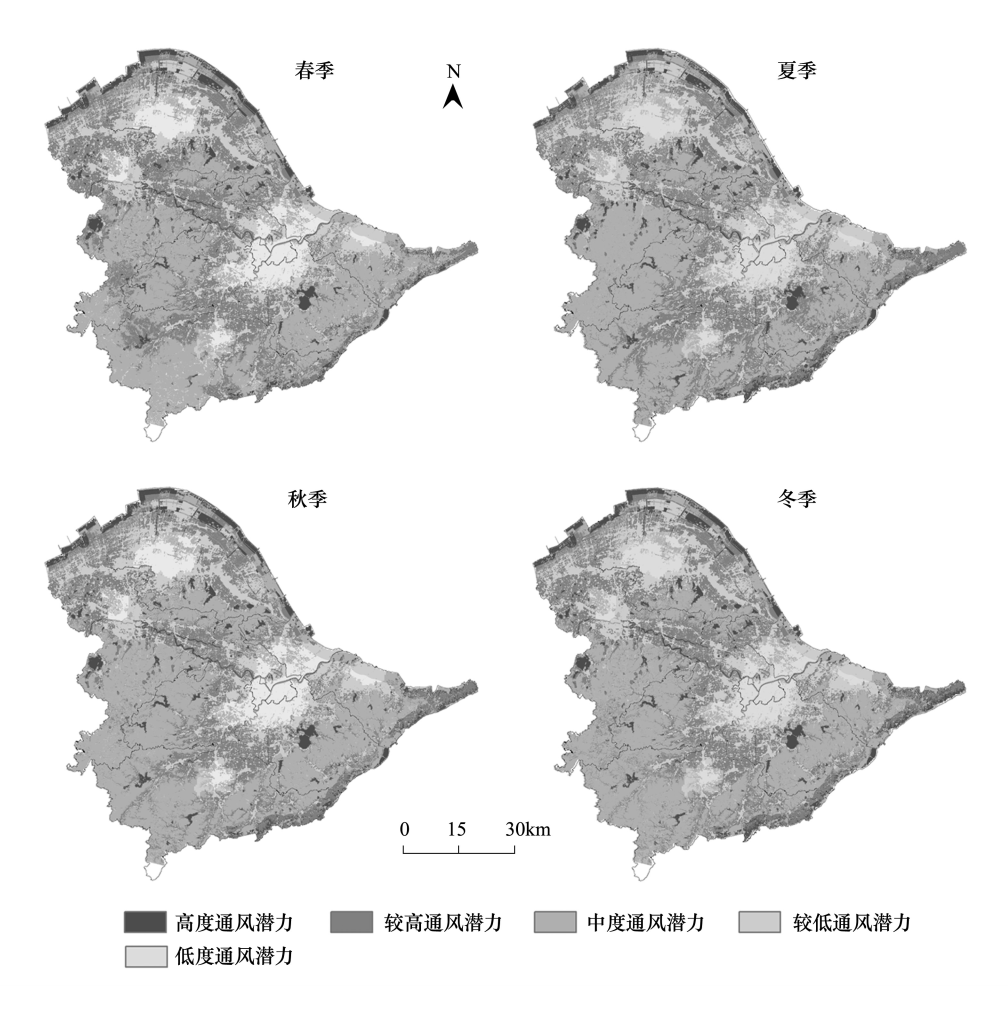


图 6 宁波市四季通风潜力分析与评估

Fig.6 Analysis and evaluation on ventilation potential in four seasons of Ningbo City

3.2 城市气候环境分析

城市气候环境状况分析与评估是本研究的核心工作,其成果为制定气候环境问题解决方案提供依据。从宁波城市气候环境分析结果(图 8)看出,城市气候环境高价值区和中价值区的城市气候环境质量良好,未承受热负荷、大气污染且通风潜力好,是新鲜空气的发源地,多分布于山体(如四明山)和水体(如东钱湖)。城市气候环境低价值区和过渡区的城市气候环境质量处于中等水平,承受轻度热负荷和大气污染,通风潜力较好,多分布于城镇周边的农田地区。另一方面,城市气候环境高风险区的热负荷强、大气污染严重、通风潜力低,通常位于北仑、镇海和杭州湾南岸的沿海重化工业带。城市气候环境中风险区分别承受了中、高度热负荷和大气污染,且通风潜力较低,多分布于江北区东部、鄞州城区东西两翼、慈溪城区和奉化城区东北部等工厂厂房密集的片区。城市气候环境低风险区则主要分布于一般的中低密度建成区。

3.3 城市气候环境规划与调控措施

通过综合分析和筛选,确定了宁波风道规划方案,共包括 2 条一级风道、5 条二级风道、3 条受海陆风影响的三级双向风道、12 条受海陆风影响的三级单向风道和 13 条受山谷风影响的三级单向风道(图 9,图 10)。一级风道位于甬江入海口—甬江—奉化江—奉化市区—象山港西岸一线,以及岩河入海口—岩河—东钱湖—横溪水库—象山港一线,利用具有降温效应的水体和夏、秋、冬三季主导风向引导新鲜气流进入北仑镇海工业带、江北区东部、奉化城区等城市气候环境高、中风险区,缓解夏、秋、冬三季的城市热负荷和大气污染问题。一级风道需要严加保护,限制甚至适当扩宽镇海区、北仑区等风道上游地区的街道宽度、降低建筑物高度和密度。二级风道位于三江口公园—余姚江—牟山湖一线、江口镇—溪口镇—亭下水库一线、甬江入海

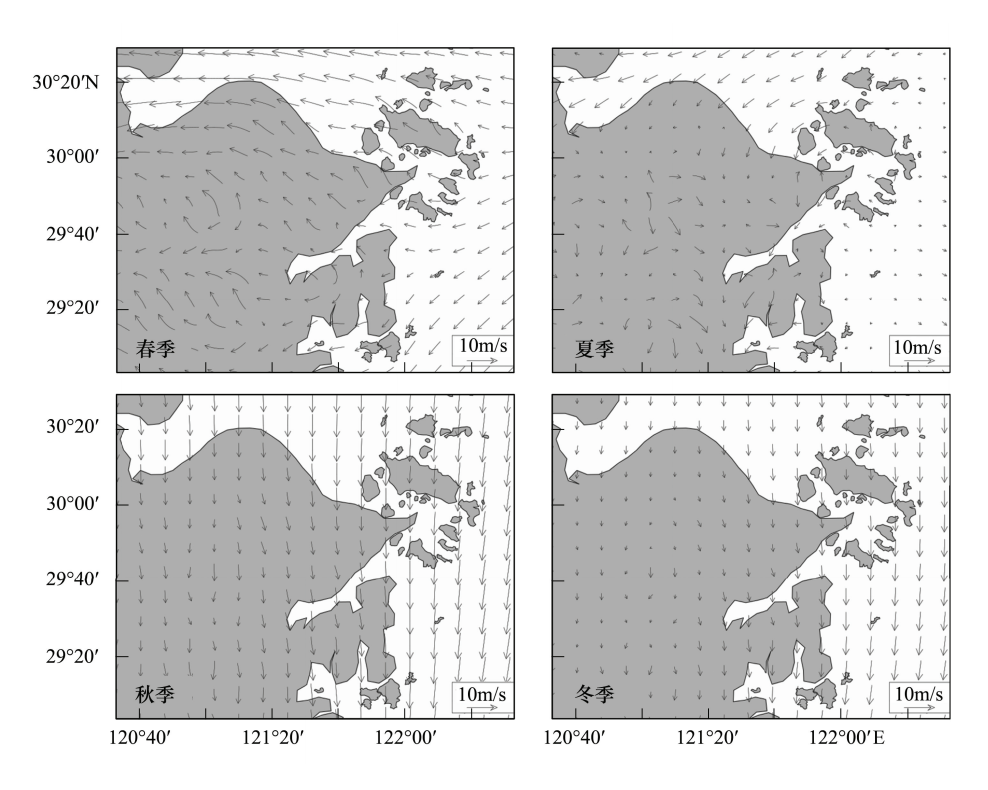


图 7　宁波市四季风环境分析与评估

Fig.7　Analysis and evaluation on wind environment in four seasons of Ningbo City

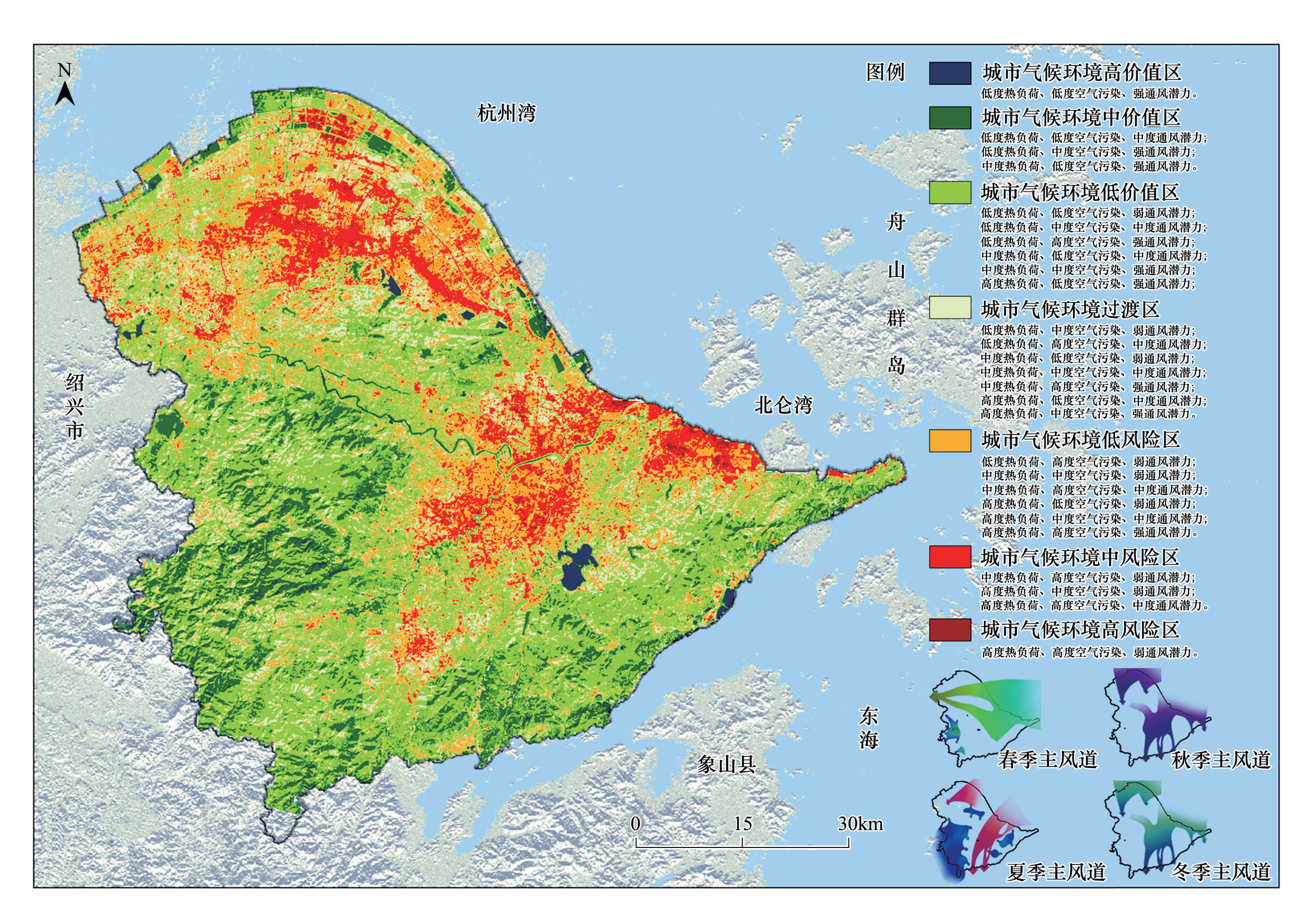


图 8　宁波市气候环境分析与评估

Fig.8　Analysis and evaluation on climate environment of Ningbo City

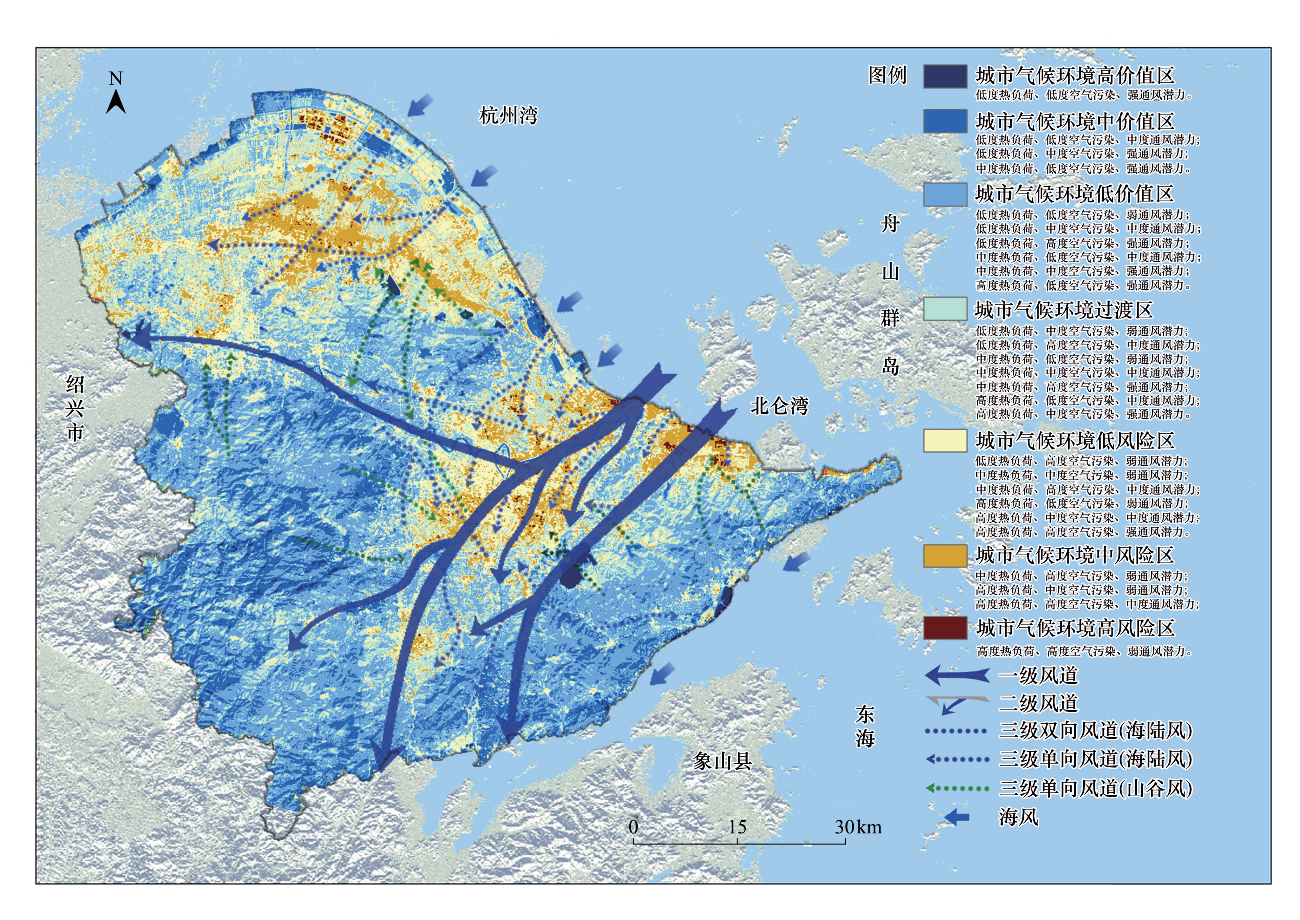


图 9 宁波市气候环境调控措施

Fig.9 Adjustment measures on climate environment of Ningbo City

口—蛟山公园—灵芝山一线、甬江公园—世纪大道—天宫庄园一线、横溪水库—白杜乡—西坞镇,利用一级风道、气候环境中高价值区和四季主导风向,改善北仑、江东、鄞州、余姚市区、奉化市区等城市气候环境中风险区或城市气候环境低风险区的气候环境,其中东—西、东南—西北向风道主要缓解春季热负荷和大气污染问题,东北—西南向风道主要缓解夏季热负荷和大气污染问题,北—南向风道主要缓解秋、冬季的大气污染问题。二级风道局部需要疏通和改善,串联主要水体和绿地引导风的流入。三级风道利用城市气候环境高价值区、城市气候环境中价值区、一级风道和二级风道来改善局地小气候环境,廊道沿线应增加水体和绿化面积,根据主导风向合理规划街道和建筑物朝向,促进城市内部的局地环流。

城市气候环境高价值区和城市气候环境中价值区应保护并拓宽风道,避免开发建设,营造城市高价值区之间的绿色联系,提高城市气候环境高价值区的影响力。城市气候环境低价值区和城市气候环境过渡区应保护及改善现有环境,在空旷地带扩大绿化和水域面积并尽量内、外双向延伸。城市气候环境低风险区和城市气候环境中风险区应避免该区域与城市气候环境中风险区、城市气候环境高风险区连成一片,通过合理布局建筑、扩宽街道和开放绿色空间等途径创造风道,利用绿地或水面衔接建筑群,促进通风和冷空气的交换。城市气候环境高风险区应避免建造庞大的建筑物或在其周围形成屏风效应,控制人口密度、建筑物高度和密度,建筑物面向主要风向及风道,降低建筑物对风道的阻力作用,提高该地区水域和绿化面积,减少人为热的释放量,改善能源利用结构。

4 结论与讨论

本研究对宁波城市气候环境进行了多季节、多环境要素的综合分析与评估,主要得出以下 3 个结论:首先,宁波城市热负荷、大气污染都具有显著的季节性和空间性差异,春、夏季同时受热负荷和大气污染影响,冬

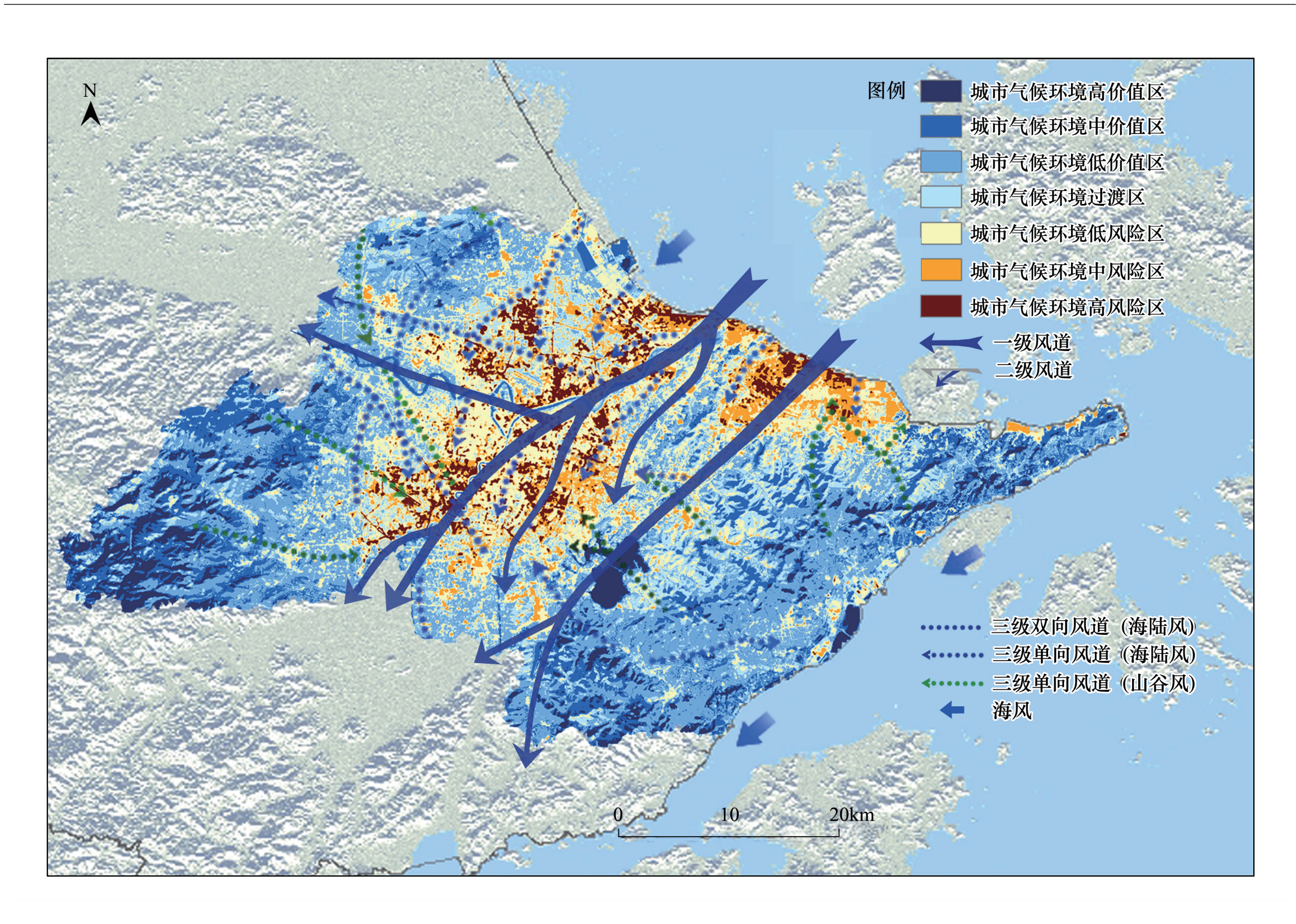


图 10　宁波城区气候环境调控措施

Fig.10　Adjustment measures on urban climate environment

季仅受大气污染影响,秋季受环境要素影响较小。通风潜力分布具有显著的空间差异性,其空间格局在季节上则具有高度的相似性。高度通风潜力多分布于水体、农田和山林,低度通风潜力集中于建筑和人口密度较高地区。其次,城市气候环境分析图显示宁波的城市气候环境高价值区和中价值区分布于山林、农田、水体,城市气候环境高风险区通常位于北仑、镇海和杭州湾南岸的沿海重化工业带,中风险区分布于江北区东部、鄞州城区东西两翼、慈溪城区和奉化城区东北部等工厂厂房密集的片区。最后,根据城市气候环境分析结果规划出 2 条一级风道,主要缓解夏、秋、冬三季的城市热负荷和大气污染问题,5 条二级风道,其中东—西、东南—西北向风道主要缓解春季热负荷和大气污染问题,东北—西南向风道主要缓解夏季热负荷和大气污染问题,北—南向风道主要缓解秋、冬季的大气污染问题。

研究综合考虑了不同季节城市气候环境的差异性和城市热岛、大气污染双重气候环境问题,从实验设计、数据获取等方面对已有的城市气候环境分析方法进行了改进,提出了一种针对多季节、多环境要素,空间化、可视化的城市气候环境分析与评估方法。该方法适用于季风气候地区复杂气候环境的分析与评估研究,能够提高城市气候环境分析的综合性和准确性,并能够通过风道规划及相关调控对策的制定和实施改善城市热负荷和大气环境质量,缓解各季节的城市气候环境问题,为城市环保、气象、规划等部门提供重要的决策支持,从而促进城市可持续发展和生态城市建设。

与国内外相关研究相比,本研究的特点在于:(1)研究区特征方面,针对我国季风气候区复杂的气候环境特点,对每个季节都进行了全面综合的分析与评估,而既有研究欧美日等城市通常只针对夏季开展城市环境气候图的研究[10-11],偶有考虑冬季[7-9];(2)气候环境要素方面,在城市热岛之外,考虑到我国城市大气污染日益严重的的现状,也将大气污染纳入了分析评价,而当前日本[10-11]、中国香港[14-15]等季风气候地区开展的相关研究仅考虑了夏季的城市热岛;(3)数据获取方面,引入了 MODIS 遥感影像反演获得的大气气溶胶光学厚

度数据,代替既有相关研究中所采用的数量非常有限的地面监测站点数据[6-7]来分析城市大气污染,有利于获得精细化的大气污染物空间分布特征。

本研究虽然对传统城市气候图方法进行了改进,但在具体应用中仍存在一定的问题。例如土地利用、人口密度等相关辅助数据精度不够高,客观上降低了气候环境评价的精度,下一步将考虑使用高分辨率遥感等手段获取精细的城市土地利用等信息。另一方面,WRF 数值模拟的城市风场空间分辨率也可以提高。最后在研究尺度方面,本文仅对城市尺度的气候环境进行了分析评估,下一步将改进实验方案,拓展数据获取途径,对小区尺度的气候环境进行精细评估,从而构建多尺度、多层次的城市气候环境分析与调控方法。

参考文献(References):

[1] Zhao X F, Huang J C, Ye H, Wang K, Qiu Q Y. Spatiotemporal changes of the urban heat island of a coastal city in the context of urbanisation. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2010, 17(4): 311-316.

[2] 黄聚聪, 赵小锋, 唐立娜, 邱全毅. 城市化进程中城市热岛景观格局演变的时空特征——以厦门市为例. 生态学报, 2012, 32(2): 622-631.

[3] Wang T J, Jiang F, Deng J J, Shen Y, Fu Q Y, Wang Q, Fu Y, Xu J H, Zhang D N. Urban air quality and regional haze weather forecast for Yangtze River Delta region. Atmospheric Environment, 2012, 58: 70-83.

[4] 朱佳雷, 王体健, 邓君俊, 姜爱军, 刘冬晴. 长三角地区秸秆焚烧污染物排放清单及其在重霾污染天气模拟中的应用. 环境科学学报, 2012, 32(12): 3045-3055.

[5] 中华人民共和国环境保护部. 2013 中国环境状况公报: 大气环境. (2014-06-05)[2015-04-01]. http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkgb/2013zkgb/.

[6] 任超, 吴恩融. 城市环境气候图——可持续城市规划辅助信息系统工具. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 12-13, 168-179.

[7] Knoch K. Uber das Wesen einer Landesklimaaufnahme. Meteorologische Zeitschrift, 1951, 5: 173-173.

[8] Baumüller J, Reuter U. Demands and Requirements on A Climate Atlas for Urban Planning and Design. Stuttgart: Office of Environmental Protection, 1999.

[9] Suder A, Szymanowski M. Determination of ventilation channels in urban area: A case study of wrocław (Poland). Pure and Applied Geophysics, 2014, 171(6): 965-975.

[10] TMG. The Thermal Environment Map and Areas Designated for The Implementation of Measures Against the Heat Island Phenomenon. Tokyo: Bureau of Environment, Bureau of Urban Development of Tokyo Metropolitan Government, 2005.

[11] Tanaka T, Moriyama M. Urban Environmental Climate Maps for supporting Environmental and urban planning works in local government. AIJ Journal of Technology and Design, 2011, 17(36): 687-692.

[12] 贺晓冬, 苗世光, 窦晶晶, 申双和. 北京城市气候图系统的初步建立. 南京大学学报: 自然科学, 2014, 50(6): 759-771.

[13] 林姚宇, 王丹, 单樑, 龚咏喜, 王耀武, 荆万里. 深圳国际低碳城环境气候图集编制方法与应用技术研究. 建筑经济, 2014, (2): 84-91.

[14] Ren C, Lau K L, Yiu K P, Ng E. The application of urban climatic mapping to the urban planning of high-density cities: The case of Kaohsiung, Taiwan. Cities, 2013, 31: 1-16..

[15] Ng E. Towards planning and practical understanding of the need for meteorological and climatic information in the design of high-density cities: A case-based study of Hong Kong. International Journal of Climatology, 2012, 32(4): 582-598.

[16] 张伟, 张崇, 王朝霞. 城市气候地图的绘制及其在规划设计中的应用. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2014, 46(2): 261-265.

[17] 邓君俊. 长三角地区霾天气形成机理和预报方法研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.

[18] 赵颜创, 赵小锋, 旷达. 宁波城市热岛随城市化演变的多指标综合分析. 生态环境学报, 2014, 23(10): 1628-1635.

[19] 中国宁波网. 细数宁波气候变化: 平均气温升高 雨量减少霾日数快速上升. (2015-03-23)[2015-04-01]. http://news.cnnb.com.cn/system/2015/03/22/008284951.shtml.

[20] 宁波市环境保护局. 宁波市空气质量实时发布系统. [2015-04-01]. http://www.nbemc.net/aqi/home/dayData.aspx.

[21] 宋挺, 段峥, 刘军志, 严飞, 黄君, 吴蔚. 基于 Landsat-8 数据和劈窗算法的地表温度反演及城市热岛效应研究. 环境监控与预警, 2014, 6(5): 4-14.

[22] NASA. Atmospheric correction parameter calculator. [2014-12-12]. http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/.

[23] 陈良富, 李莘莘, 陶金花, 王中挺. 气溶胶遥感定量反演研究与应用. 北京: 科学出版社, 2011: 56-80.

[24] 章国材. 美国 WRF 模式的进展和应用前景. 气象, 2004, 30(12): 27-31.

[25] 罗梦森, 何浪, 彭华青. 基于 WRF 模式的江苏沿海风资源评估. 江苏农业科学, 2011, 39(3): 486-491.

[26] 谢苗苗, 周伟, 王仰麟, 常青. 城市土地利用的热环境效应研究——以宁波城区为例. 北京大学学报: 自然科学版, 2008, 44(5): 815-821.

[27] Eum J H, Scherer D, Fehrenbach U, Köppel J, Woo J H. Integrating urban climate into urban master plans using spatially distributed information—The Seoul example. Land Use Policy, 2013, 34: 223-232.